

混成防波堤直立部の滑動実験

—1/10 模型における実験—

永井 莊七郎*・玉井 佐一**

1. 実験の目的

『暴風時に混成防波堤の直立部が砕波の圧力によって滑動するのは、直立部の各高さにおける波圧の最大値 (P_{peak}) のうちの最大圧力 (P_{max}) が作用する瞬間の直立壁における同時波圧、すなわち、最大同時波圧の合力 (P_{max}) が直立部の摩擦抵抗力より大きくなったときである』¹⁾ ということを発表した²⁾。この考え方に対して各方面から質問があったので、実物のほぼ 1/20 の模型 3 種類 (その直立部はモルタルで造り空気中の重量 77.6 kg, 116.2 kg, 119 kg) について滑動実験を行なった。その実験における直立部前面の水深 (基礎捨石堤天端上の水深) $h_1=6, 12, 14, 18$ cm, 水槽の全水深 (水平底部の全水深) $h_0=43, 49, 51, 55$ cm, 実験波の周期 $T_m=1.33 \sim 1.92$ sec (現地に換算した周期 $T_p=6.0 \sim 8.6$ sec), 波高 $H_m=14 \sim 21$ cm (現地に換算した波高 $H_p=2.8 \sim 4.2$ m), 波形勾配 $H/L=0.060 \sim 0.081$ であった。この実験により、直立部に働く砕波の最大同時圧力の合力 (P_{max}) が直立部の摩擦抵抗力 (R) よりわずかに大きくなると、 P_{max} が働いた瞬間に直立部は全体的に港内側に滑動することが明らかになり、上記の考え方が正しいことが証明された³⁾。

当実験室においては昭和 28 年以来現在まで、実物の 1/20~1/40 の模型を使って、諸種の形式の防波堤についてそれに働く波圧、越波状況などに関する相当広範囲の 2 次元および 3 次元の実験を行なってきた。その中のいくつかのものはすでに実施されているが、台風時における現地の状況は実験室における現象に非常によく相似している。また伊勢湾台風時の和歌山県下の諸港における混成防波堤直立部の滑動に対して、上記の砕波の最大同時波圧式を用いて検討した結果、滑動の原因を合理的に説明することができた³⁾。

以上のような実験結果の現地における検証から、現地のほぼ 1/20~1/25 の縮尺で行なった波浪水槽における実験結果 (風のある場合および風がない場合) は Froude の相似法則を用いてそのまま現地に適用してさしつかえないと考えられる。しかしながら、現地の技術者あるいは最近において波の実験を行っていない研究者の中には、実験室の結果には model scale の影響などがある

ので、Froude の相似法則を用いてただちに適用するには疑問を持っている人が相当多いようである。アメリカ合衆国などにおいても、Beach Erosion Board, Waterways Experiment Station などにおける防波堤関係の実験結果に対して、現地の技術者から同じような質問が提起されているが、実験者は縮尺 1/20~1/25 くらいの実験によって得られた結果は相似率によってそのまま現地に適用できると信ずる旨を答えている。

すでに記したように、当研究室においては従来発表してきた防波堤、防潮堤に関するわれわれの実験結果は現地に適用してさしつかえないと信じているが、なお念のために従来よりは規模の大きい実験を行なって、縮尺の相違が実験結果におよぼす影響を調べて、質問者の疑問に答えたいと考えていた。それで今回、大型波浪水槽 (長さ 58.50 m, 幅 10 m, 深さ 1.90 m) を用いて現地のほぼ 1/10 の混成防波堤を造り、暴風時のほぼ 1/10 の砕波を起こして直立部の滑動に関する実験を行なった。

2. 実験設備および実験方法

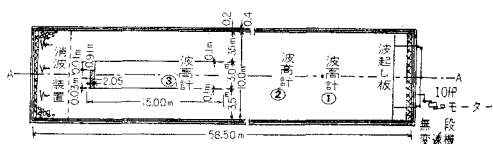
(1) 実験設備

大和川右岸にある河海工学実験場 (屋外実験場約 130 m×50 m, 6 500 m²) にある大型波浪水槽 (図-1) を用いた。この水槽においては防波堤および波とも現地の 1/10 のものを造ることができるようになっている。

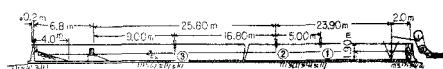
この水槽の幅は 10 m であるが、今回の実験には図-1 (a) に示すように、中央部の 3.0 m だけを使用することにし、両側壁をモルタルブロックで仕切った。混成防波堤は基礎捨石堤部を幅 3 m の全長にわたって木造とし、その高さは 74 cm, 外のはりは 1:2 に造った。直立部は長さ 2.05 m, 幅 0.4 m, 高さ 0.6 m のコンクリートで造り、その空気中の重量は水を十分にふくんだとき W

図-1 実験水路

(a) 平面図



(b) A-A 断面図



* 正員 工博 大阪市立大学教授 工学部

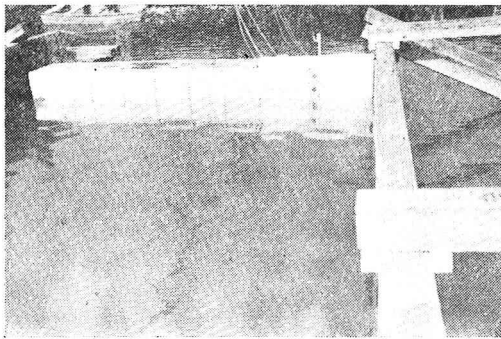
** 正員 大阪市立大学助手 工学部

$=1048.7 \text{ kg}$ である。直立部はその前面に 0.2 m の水平部があるように基礎捨石堤天端上に設置した。これらの寸法はすべてさきに行なった実物の $1/20$ 模型における実験—Ⅲ* に使用したものの2倍である。ただし直立部は今回はコンクリートで造ったため、長さとは幅は2倍になっていない。直立部のうち、 $3.0 - (2.05 + 0.01 + 0.03) = 0.91 \text{ m}$ は木板の固定壁とし、その幅の中央部に波圧計を6個取りつけた(図—2)。この波圧計は当研究室で造ったひずみ計型のものである。

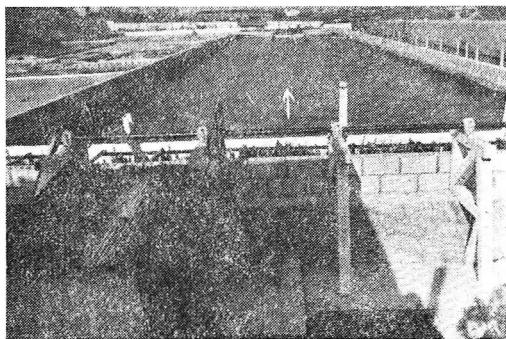
直立部の背後には図—2に示すような位置に3個の移動計を取りつけた。この移動計は $1/10 \text{ mm}$ までの微動を測定することができる。移動計と波圧計とは同時に作動するようにになっている。

基礎捨石堤部を木造にしたのは、 $1/20$ 模型の実験におけると同様、滑動に対する直立部と基礎捨石堤天端との

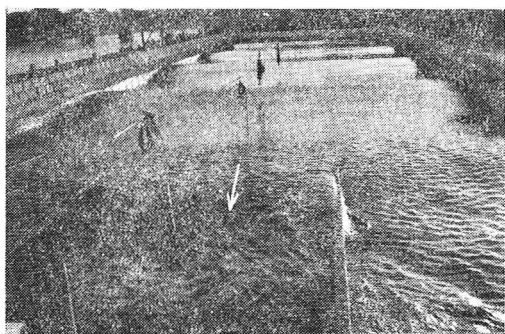
写真—2 直立部(左側コンクリート造の移動部、右側木造の固定壁)と波圧計



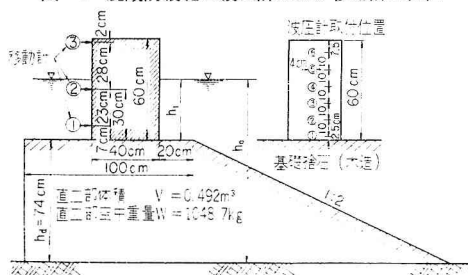
写真—1 (a) 造波装置から防波堤方向を望む



写真—1 (b) 防波堤から侵入波を望む



図—2 混成防波堤と波圧計および移動計の位置



間の摩擦係数 (f) を一定にするためであって、この場合も前回と同様に $f=0.81$ にとった。

(2) 実験方法

さきに行なった $1/20$ 模型における実験 I, II, III* の結果と比較するために、それらとほぼ同じ条件において実験した。

波高は図—1に示すように3点で測定したが、防波堤が設置されている幅 3.0 m の部分においては波の反射がいちじるしく、ほぼ第5波以後においては波高計③における波高は反射波の影響で波高計①, ②の波高より大きくなったので、反射波の影響が少ない波高計①, ②における第5~7波の波高の平均値をとって侵入波の波高 H とした。波高計、波圧計および移動計は常に第1波から記録した。

3. 実験結果

(1) 実験 No. 1

$1/20$ 模型について行なった3種類の実験のうちで、直立部の重量 W が最大であったもの、したがってこれを滑動させた最大同時圧力の合力 $P_{\max}$ が最大であった実験—Ⅲ と相似な条件で実験を行なったのが今回の実験 No. 1 である。

$1/20$ 模型における 実験—Ⅲ においては直立部前面水深 $h_1=18 \text{ cm}$ 、基礎捨石堤の天端までの高さ $h_d=37 \text{ cm}$ 、全水深 $h_0=h_1+h_d=55 \text{ cm}$ 、直立部前面の水平部幅 $B=10 \text{ cm}$ 、基礎捨石堤の外りの $1:2$ であったから、今回の実験ではこれらの寸法は2倍に造られた。すなわち

$$h_1=36 \text{ cm}, h_d=74 \text{ cm}, h_0=h_1+h_d=110 \text{ cm},$$

$$B=20 \text{ cm}$$

外りの $1:2$

実験波については $1/20$ 縮尺のときは $T_m=1.38 \text{ sec}$ 、 $H_m=21 \text{ cm}$ 、 $L_m=258 \text{ cm}$ 、 $H_m/L_m=0.081$ であったから今回はまず周期を Froude の相似率で合わせて $T_m=1.95 \text{ sec}$ ($T_p=6.17 \text{ sec}$) にして、波高 H_m を $1/20$ 縮尺のときの2倍になるように造波装置を調整したが、実際

写真-3 防波堤に砕波が衝突したときの跳波

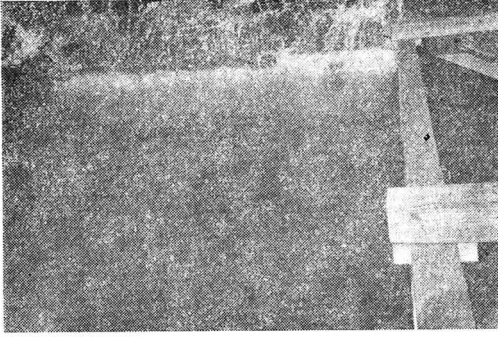
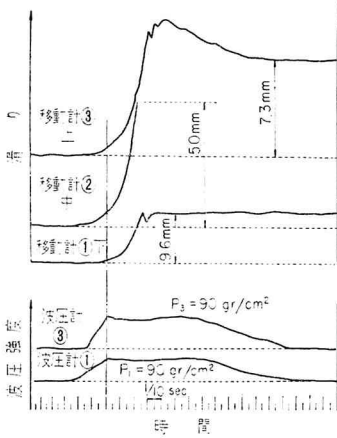
 $h_1=36\text{ cm}, T_m=1.95\text{ sec}, H_m=39\text{ cm}, H_m/L_m=0.074$


図-3 直立部における波圧と移動の時間的変化

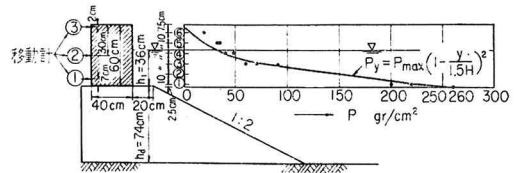
 $h_1=36\text{ cm}, T_m=1.59\text{ sec}, H_m=39\text{ cm}, H_m/L_m=0.074$


に起こった実験波の波高 $H_m=39\text{ cm}$ 、波長 $L_m=527\text{ cm}$ 、 $H_m/L_m=0.074$ であって完全にはならなかった。このような波を防波堤に衝突させると、第5波から激しく砕波して写真-3に示すように大きな跳波を生じた。この第5波が衝突したとき、直立部は全体に滑動した。そのときの Oscillo-bromide に記録された波圧計①、②、③（直立部底部付近）における波圧強度と移動計①、②、③における移動の時間変化を示すと図-3のようである。ただし波圧計②は不調であったので、図-3においてはその記録を除いた。

図-3によると最も底面に近い波圧計①（底面から上方2.5 cm）に圧力が働き始めてから0.1 sec おくれて波圧計③（波圧計①から上方20 cmの位置）に圧力が働き始めているが、2点における最大圧力（ p_{peak} ）は同時に働いている。3個の移動計のうち、高さの中央にある移動計②は波圧計①に圧力が作用し始めると同時に港内側へゆるやかに動き始めている。上部の移動計③はそれよりほぼ0.1 sec おくれて港内側に動き始めている。最下部にある移動計①は波圧計①と③における圧力が最大値（ p_{peak} ）になるほぼ0.05 sec 前に移動し始めている。この砕波の直立部における最大同時波圧の分布は1/20縮

尺の実験ⅢにおいてはB型分布であったが、今回の実験においてはC型分布を示した。B、C型いずれの分布においても直立壁の各高さにおける p_{peak} のうちの最大値 p_{max} は直立壁の底部に起こるから、この砕波においては、最大同時圧力は底部の圧力が最大になったときに起こらなければならない。したがって波圧計①に p_{peak} が起こったとき（この p_{peak} が p_{max} である）に直立壁には最大同時波圧の合力 P_{max} が生じている。図-3によれば p_{max} が起こる時刻よりも0.04 sec だけ早く直立部がずべているから、最大同時波圧の合力 P_{max} の値がこの場合の直立部の摩擦抵抗力 R より相当大きかったため、砕波の圧力の合力 P_{max} に達する直前に R の値より大きくなったと考えられる。

図-4 直立壁における最大同時波圧の分布（C型分布）



数回の実験をくり返して直立壁における最大同時圧力の分布を調べると図-4のようであった。この分布はすでに記したようにC型分布であって、 $p_{\text{max}}=260\text{ g/cm}^2$ 、 $P_{\text{max}}=(1/2) \cdot p_{\text{max}} \cdot H=(1/2) \times 260 \times 39=5070\text{ g/cm}$ である。

いま計算によって p_{max} 求めると

$$h_1 \frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{H}{L} = 36 \times \frac{36}{110} \times 0.074 = 0.872\text{ cm} > 0.44\text{ cm}$$

であるから、 $p_{\text{max}}=200 \sim 260\text{ g/cm}^2$ でなければならないことになる¹⁴⁾。この p_{max} の値は実験値によく一致している。

この場合の直立部の水中重量 $W'=753.5\text{ kg}$ であるから、滑動に対する摩擦抵抗力 R は

$$R = 0.81 \times \frac{753.500}{205} = 2.977\text{ g/cm}$$

である。この値は P_{max} に比してかなり小さい。すでに記したように、 R に比して P_{max} が相当大きいので、最大同時波圧に達するわずかに前に砕波の圧力の合力 P が R より大きくなったので、直立部が滑動したという考え方が正しいことを証明している。この実験を行なう前には最大同時波圧の分布は1/20縮尺における実験Ⅲと同様B型であろうと予期していたが、実験を行なってみるとC型分布であった。前記の参考文献の中にも記しているとおり、B型分布はA型とC型との中間の過渡的状态において生ずる分布で、境界条件のわずかの違いによってA型分布あるいはC型分布に転移する。

(2) 実験 No. 2

実験 No. 1 においては P_{max} が R に比して過大であ

写真-4 防波堤に衝突したときの砕波

$h_1=36$ cm, $T_m=1.95$ sec, $L_m=527$ cm,
 $H_m=28.3$ cm, $H_m/L_m=0.054$

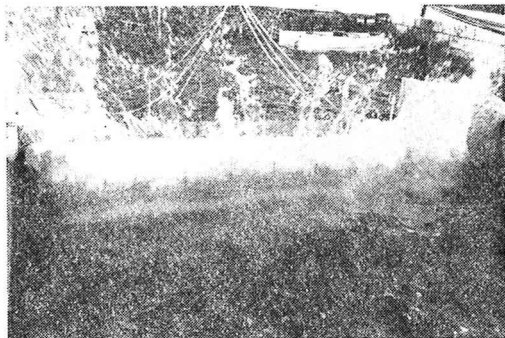
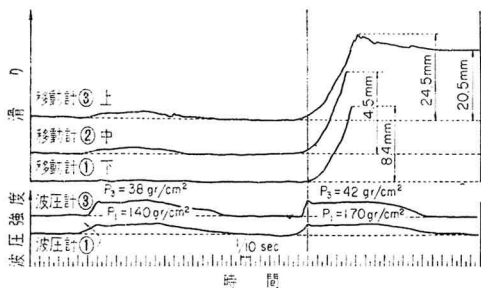


図-5 直立部における波圧と移動の時間的変化

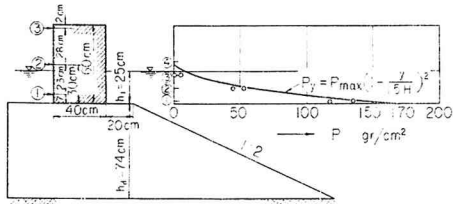


ったので, h_1, T_m は No. 1 と同じにして, 波高 $H_m=28.3$ cm に減少した。その結果, 第5波およびそれ以後において写真-4に示すように激しく砕波し, 第5波が砕波して衝突したとき直立部は全体的に港内側へ滑動した。このときの波圧計①, ③(②は不調で除く)の波圧および移動計①, ②, ③における移動の時間的変化を示すと図-5のようである。

図-5によれば, 波圧が作用し始める時刻は, 波圧計③においては波圧計①におけるよりも約0.07 secおくれているが, 両者の p_{peak} は同時に起こっている。図-6に示すように, この場合の最大同時波圧の分布はC型分布であるから, 波圧計①が p_{peak} になったとき, 直立部底部に p_{max} が起こっている。したがって波圧計①と③が p_{peak} になった瞬間に最大同時波圧 P_{max} が起こっているわけである。移動計の記録によれば, 波圧計①に圧力が作用し始めてから0.05 secおくれ移動計②と③がほぼ同時に移動し始めている。下部の移動計①は波圧計

図-6 直立部における最大同時波圧の分布

$h_1=36$ cm, $T_m=1.95$ sec, $H_m=28.3$ cm, $H_m/L_m=0.054$



①と③が p_{peak} になったとき, すなわち P_{max} が起こった瞬間に移動している。このことは直立壁に P_{max} が働いた瞬間に直立部全体が港内側へ滑動したことを示す。

直立壁における波圧分布を示すと図-6のようで, C型分布で $p_{max}=220$ g/cm² である(この値は計算からも求められる)。

$$\therefore P_{max} = \frac{1}{2} \times 220 \times 28.3 = 3113 \text{ g/cm}$$

このときの直立部の摩擦抵抗力 $R=2977$ g/cm であるから, P_{max} はわずかに R より大である。それゆえ, ちょうど P_{max} が働いた瞬間に直立部はすべったわけである。

(3) 実験 No. 3

つぎに $h_1=25$ cm に減じ, $T_m=1.95$ sec ($T_p=6.17$ sec), $H_m=21$ cm, $L_m=513$ cm, $H_m/L_m=0.041$ の波を防波堤にあてると, 写真-5のように砕波して衝突するが, No. 1 および No. 2 の場合に比してかなり弱いのので, 波圧強度もまた小さい。この場合の直立壁における最大同時圧力の分布は図-7に示すようにC型分布であって, $p_{max}=170$ g/cm² である。いまこの値を計算によって求めると

$$h_1 \frac{h_1}{h_0} \frac{H}{L} = 25 \times \frac{25}{99} \times 0.041 = 0.259 \text{ cm}$$

であるから

$$h_1 \frac{h_1}{h_0} \frac{H}{L} \leq 0.44 \text{ cm}$$

の範囲においては

$$p_{max} = 500 w_0 h_1 \frac{h_1}{h_0} \frac{H}{L} + 40 = 170 \text{ g/cm}^2$$

写真-5 防波堤に衝突したときの砕波

$h_1=25$ cm, $T_m=1.95$ sec, $H_m=21$ cm, $L_m=513$ cm,
 $H_m/L_m=0.041$

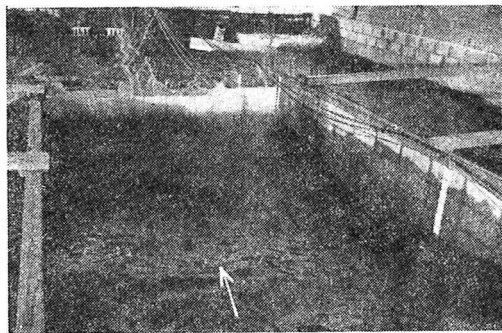


図-7 直立壁における最大同時波圧の分布

$h_1=25$ cm, $T_m=1.95$ sec, $H_m=21$ cm, $H_m/L_m=0.041$

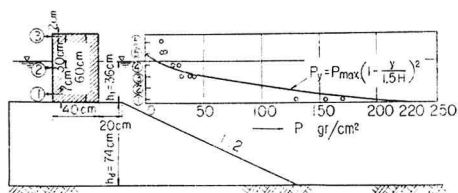
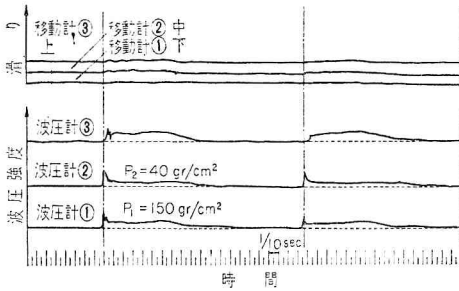


図-8 波圧計と移動計の記録



を得る。この値は実験値から求めた値と全く同じである。最大同時波圧の合力は

$$P = \frac{1}{2} p_{\max} \cdot H = \frac{1}{2} \times 170 \times 21 = 1785 \text{ g/cm}$$

である。この場合の直立部の摩擦抵抗力 R は

$$R = 0.81 \times \frac{843700}{205} = 3336 \text{ g/cm}$$

であるから、 $R > P$ であって、直立部は全体的にはすべらない。

いま波圧計①、②、③および移動計①、②、③の Oscillogram 上の同時記録を示すと 図-8 のようである。図-8 によると、波圧計①、②、③における波圧はほぼ 0.01 sec ずつおくらせて働き始めているが、 p_{peak} は①と②と同時に起こり、それぞれ $p_{\text{peak}} = 150 \text{ g/cm}^2$ 、 40 g/cm^2 を記録している。波圧計③における p_{peak} は 0.04 sec ほどおくられている。最下部の移動計①は全く移動していないが、移動計②と③とは波圧計①と②に p_{peak} が起こった瞬間に少し港内側に動いて小さい振動をしている。

(4) 実験 No. 4

直立壁前面水深 $h_1 = 50 \text{ cm}$ に増し、 $T_m = 1.95 \text{ sec}$ 、 $H_m = 40 \text{ cm}$ 、 $L_m = 542 \text{ cm}$ 、 $H_m/L_m = 0.074$ の波を起こすと、波は大部分が越波して砕波しない。その状況は写真-6 に示すとおりである。このときの波圧計および移動計の同時記録を示すと 図-9 のようである。この実験においても波圧計②は不調であったのでその記録を除いた。

このときの最大同時波圧は 図-10 に示すように直立壁の全体にはほぼ一様の強度で作用し、その合力 $P_{\max} = 1271 \text{ g/cm}$ である。直立部の摩擦抵抗力 $R = 2524 \text{ g/cm}$ であるから、直立部は全体的にはすべらない。しかし直立部の上部が波と同じ周期でゆるやかに振動している。

わが国の防波堤の大部分は天端が満潮位上 2~2.5 m 以下であるから、暴風時には天端は海面以下に没するか、または海面上わずかに頭を出しているという状態である。したがって大きな波の大部分は天端上を越波して港内へ侵入する。実験 No. 4 はこのような場合を対象

写真-6 防波堤天端上を越流する状況

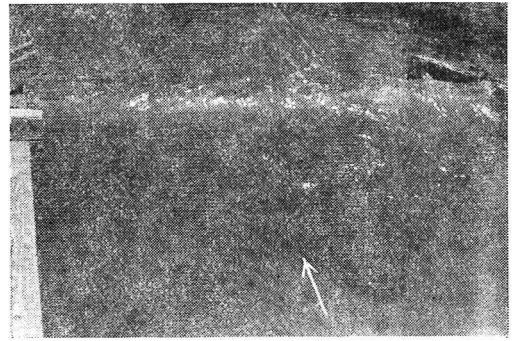


図-9 波圧および移動の同時記録

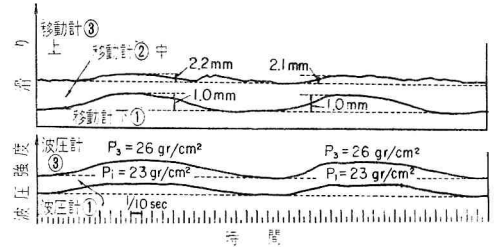
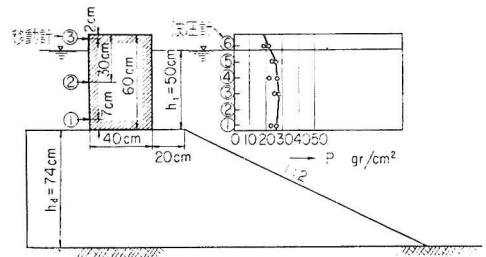


図-10 直立壁における最大同時波圧の分布

$h_1 = 50 \text{ cm}$ 、 $T_m = 1.95 \text{ sec}$ 、 $H_m = 40 \text{ cm}$ 、 $L_m = 542 \text{ cm}$ 、 $H_m/L_m = 0.074$



としたものであるが、直立壁における最大同時波圧の分布が天端から底部までほぼ一様であることは、従来経験的に広井式による波圧が天端から底部まで一様に働くと仮定していたことと一致して興味ぶかい。しかし波圧強度は $p = 19 \sim 28 \text{ g/cm}^2$ であって、広井式による値のほぼ 40% である。

4. 結 論

暴風時に波高 $H = 2 \sim 6 \text{ m}$ 程度の波が砕波して混成防波堤の直立部に激突するときに作用する大きな衝撃圧力について、昭和 28 年以来今日まで数 1000 回以上の実験を行ってきた。それらの実験は大部分が実物の 1/20 縮尺の 2 次元実験であるが、一部分は 1/25 縮尺の 2 次元実験と 1/40 縮尺の 3 次元実験である。

これらの実験によって、混成防波堤の直立部が砕波によって滑動するのは、直立部に働く砕波の最大同時波圧の合力 $P_{\max}$ が直立部の摩擦抵抗力 R より大きくなったときである。この砕波の最大同時波圧の鉛直分布は

A, B, C 型の3種類に大別できるが、最もしばしば起こるのはA型とC型分布である。これらの分布は式によって表わされ、したがってその合力 $P_{\max}$ の値も計算によって求めることができる』ことを明らかにした²⁾。この論文において、1/20 縮尺の防波堤について行なった実験結果は Froude の相似率を用いて現地に換算すると、A 型分布をなすときは Minikin 式と同一分布で、しかも合力 $P_{\max}$ の値も非常に近く、天端が低くて、碎波が大きく越波するような場合には、 $P_{\max}$ の値は、広井式を用いて天端から底部まで波圧強度が一定であると仮定して求めた値に $\pm 50\%$ 以内の差がある。また浦戸港、Dieppe 港(フランス)などにおける古い実測値も異常碎波の衝撃圧力として説明することができた。

しかしながら、作用時間が 1/50~1/500 sec というような瞬間的な衝撃圧力によって防波堤の直立部が滑動するという点について多くの人から質問を受けたので、これを実証するために、実物の 1/20 縮尺の混成堤で、その直立部を空気中の重量 $W=78\sim 119$ kg のモルタルブロックで造り、これに種々な特性の碎波を衝突させ、波圧とブロックの移動とを同時に測定した。その結果、碎波の最大同時圧力の合力 $P_{\max}$ の値が直立部の摩擦抵抗力 R よりわずかに大きくなると、直立部は全体的に港内側にすべることが確かめられた²⁾。

この滑動実験および波圧の実験はともに実物の 1/20 縮尺の模型について行なったので、模型縮尺の影響があるかもしれないと思われたので、今回大型水槽を用いて

1/10 縮尺の防波堤を造って実験を行なった。1/20 縮尺で行なった2次元実験水槽は幅が2.0mであったので側壁の影響が入っているかもしれないと思われたので今回は幅 10 m のうちの中央部 3 m だけを使用し、直立部のうち可動部は空気中の重量 $W=1048.7$ kg のコンクリートブロック(長さ 2.05 m)で、固定部は木の直立壁(長さ 0.91 m)で造り、両側の各 3.5 m の部分は反射波を消すために残した。

さきに行なった縮尺 1/20 の実験とほぼ相似の条件で実験を行なったが、すでに記したように、計算によって予期したとおりに、 $P_{\max}$ が R より大きくなったときに約 1 t の直立部が全体的に港内側に滑動した。これに反し $P_{\max}$ が R より小さい場合には、直立部は波の周期とほぼ同じ周期で振動するのみで、全体的には滑動しなかった。

このように 1/10 縮尺と 1/20 縮尺の実験結果には模型縮尺の影響はなく、実験結果は Froude の相似率を用いてそのまま実際に適用してさしつかえないことを証明している。

参 考 文 献

- 1) 防波堤に働く碎波の圧力に関する研究、土木学会論文集、第 65 号、別冊 3-3、昭和 34. 12.
- 2) 混成防波堤直立部の滑動および底面に働く揚圧力、第7回海岸工学講演会講演集、昭和 35. 11.
- 3) 伊勢湾台風の和歌山県下の諸港湾における最大波浪の推定、土木学会誌、45-6、昭 35. 6.
- 4) 永井莊七郎：港湾工学、pp. 47.